

绿色制造背景下铝合金锻造加工技术研究

杨 阳

中国电建集团河南电力器材有限公司, 河南 漯河 462000

[摘要]铝合金锻造加工技术是实现轻量化制造的关键工艺路径,在绿色制造战略深入推进的背景下,其低碳化、高效化转型需求日益迫切。文中系统分析了铝合金锻造加工的技术特点,从材料利用率、能源消耗、质量稳定性及资源循环利用四个维度剖析了当前面临的主要问题,并提出了优化锻造工艺参数、应用节能环保型设备、加强质量控制、推进智能化数字化锻造以及完善废料回收体系等系统性优化措施。研究表明,通过工艺创新与技术升级的协同推进,铝合金锻造加工可在保证产品性能的前提下显著降低资源消耗与环境影响,为行业绿色转型提供可行路径。

[关键词]绿色制造; 铝合金锻造; 材料利用率; 节能降耗; 数字化锻造

DOI: 10.33142/aem.v8i6.20101

中图分类号: TG319.1

文献标识码: A

Research on Aluminum Alloy Forging Processing Technology under the Background of Green Manufacturing

YANG Yang

PowerChina He'nan Electric Power Equipment Co., Ltd., Luohe, He'nan, 462000, China

Abstract: Aluminum alloy forging technology is a key process path for achieving lightweight manufacturing. With the deepening of green manufacturing strategy, the demand for low-carbon and high-efficiency transformation is becoming increasingly urgent. The technical characteristics of aluminum alloy forging processing were systematically analyzed in the article, and the main problems currently faced were analyzed from four dimensions: material utilization rate, energy consumption, quality stability, and resource recycling. Systematic optimization measures were proposed, including optimizing forging process parameters, applying energy-saving and environmentally friendly equipment, strengthening quality control, promoting intelligent digital forging, and improving waste recycling system. Research has shown that through the collaborative promotion of process innovation and technological upgrading, aluminum alloy forging processing can significantly reduce resource consumption and environmental impact while ensuring product performance, providing a feasible path for the industry's green transformation.

Keywords: green manufacturing; aluminum alloy forging; material utilization rate; energy conservation and consumption reduction; digital forging

引言

全球气候治理以及资源约束变大,绿色制造成了制造业转型的主要趋向。铝合金具有轻量化的特点,在航空、汽车、电子等各个领域都有广泛的使用,锻造加工是高端零部件制造的重要环节。但是铝合金锻造能耗大、材料消耗多,不符合绿色制造理念。2025 年我国印发了《中国制造 2025》,提出全面推行绿色制造,创建高效、清洁、低碳、循环的绿色制造体系,对铝合金锻造的转型提出了明确的要求。研究结果表明,绿色锻造技术体系使用以后,铝合金锻件综合能耗能降低 25%以上,材料利用率可以达到 85%左右。近几年来,机电所自主研发的射流式铝

合金加热炉、专用电动螺旋压力机以及总线协同控制技术,已经实现了对铝合金锻造成套装备技术的自主可控,为绿色化发展打下了基础。本文从绿色制造的角度出发,对铝合金锻造技术特点及存在的问题进行系统的梳理,并从工艺、设备、质量、数字化、循环五个方面提出相应的改进措施,为行业的转型提供一定的借鉴。

1 铝合金锻造加工技术特点

铝合金锻造是将坯料施加压力使其发生塑性变形,得到所需形状、尺寸和力学性能零件的一种成形方法。铝合金密度小、比强度大、耐腐蚀,锻造后组织致密、晶粒细小,力学性能明显提高。其技术特点主要表现在成形质量

好,锻造可以压实内部孔隙、改善流线分布,承载能力比铸件更好;材料适应性强,可以满足各种牌号的工业需求;加工精度不断提高,等温锻造、精密模锻等先进工艺使锻件接近净成形。等温精密锻造技术可以使材料利用率提高到 70%~80%以上,机加工量和自由锻件、普通模锻件相比分别降低 90%和 70%以上,机加工周期缩短 4~6 倍。但是铝合金的锻造塑性窗口小,温度、变形速度敏感,控制要求高。在绿色制造的背景下,此技术必须由原来的只注重效率向资源节约和环境友好转变。

2 绿色制造背景下铝合金锻造加工存在的问题

2.1 材料利用率有待提高

材料利用率低是铝合金锻造加工一直存在的问题。传统的锻造工艺一般需要在成型之后再做大量的切削加工,而且锻造飞边、连皮等工艺余料不可避免地存在,造成大量的铝合金材料浪费。目前汽车铝锻控制臂产品材料利用率低、锻造生产线水平智能化程度不高,开发绿色锻造成型工艺提高材料利用率,设计开发高端锻造智能装配提高生产线水平趋于自动化。用生产投影厚度为 5mm 的笔记本电脑显示器背盖来举例,传统的全铣加工需要用 7mm 厚的铝板原料,而采用新的工艺只需要 3mm,原料成本降低了约 40%。从侧面反映出有大多数铝合金锻造生产线的材料利用率还很低,即使经过工艺改进之后也有明显提高,但是它的基准值就说明了传统工艺的材料浪费十分严重。另外,在坯料制备过程中,用传统全铣工艺加工铝合金构件时,需要从一块完整的铝合金型材上“雕刻”出零件,材料浪费严重。由于铝合金原材料价格波动、资源紧张等原因造成材料利用率低,不但会造成生产成本的增加,而且会违背绿色制造对资源高效利用的基本要求。

2.2 能源消耗较高

铝合金锻造属于典型的高耗能加工过程,能源消耗贯穿于坯料加热、锻造成形、热处理等各个环节。铝合金坯料在锻造前一般要加热到 350℃~500℃的温度范围内,传统的电阻加热或者燃气加热方式能量转换效率低,大量的热能散失到空气中。MW 级超导感应加热技术利用超导体在低温下保持稳定的零电阻超导状态,通过金属在磁场中运动产生的涡流来加热,具有高穿透性、高能效性、高均匀性、梯度性等特点,特别适合于大口径金属工件的高效节能加热。该技术可以将工件加热能效由交流感应加热技术的不足 50%提高到 80%以上,加热吨能耗从 300 度电降到 150 度电,无废水、废气^[1]。以某轻铝锻压生产线降碳节能改造项目为例,加装 1 台 MW 级航空铝锻压

专用型超导感应加热装置,年碳减排量约 7200t。对比可知,传统加热方式的能耗和碳排放强度有极大的改善余地。

2.3 加工质量稳定性不足

铝合金锻造加工质量稳定受坯料组织均匀性、加热温度控制精度、模具状态、变形速率等因素的影响,任何一个环节的波动都会造成锻件产生缺陷。7050 铝合金具有良好的力学性能,适合制造高强度、高断裂韧性、耐应力、耐剥落腐蚀的主承力零件,但是锻件制造工艺难度大、工序多,在制造过程中容易产生夹渣、气孔、裂纹等各种缺陷,严重影响产品的合格率。铝合金对变形温度、应变速率比较敏感,温度过高容易造成晶粒粗大或者过烧,温度过低容易产生开裂。铝合金加热模锻的工艺特点有流动性差、塑性低、导热性好、锻造温度范围窄、始锻温度和终锻温度要求严格。铝合金极易产生折迭和裂纹两个质量缺陷,折迭会减小零件的承载面积,服役时容易产生应力集中成为疲劳失效源,危害大,折迭废品占锻件废品总数的 70%~80%。在生产实践中对铝合金模锻件折迭、裂纹两大质量缺陷实施质量控制,要以预防为主,工艺技术与生产管理相融合。

2.4 环保与资源循环利用水平有待提升

铝合金锻造加工产生的环境问题有废料排放、废气处理以及冷却介质污染等问题。锻造飞边、切削屑等固体废物如果不能被及时回收,就会造成资源的浪费以及环境污染。目前大多数企业废铝回收还处在粗放型的回收方式上,没有建立起系统的分类回收、保级利用体系。再生铝保级利用为攻坚战,用微合金化技术使汽车结构件中再生铝的含量达到 85%以上。但是该技术进步在实际锻造生产中推广使用的情况仍然很有限。在华东金属城废铝分拣中心,工人们正在用光谱仪对堆积如山的废旧铝材进行精准分选,“建筑型材、汽车轮毂、易拉罐的合金成分不一样,必须分门别类才能达到保级利用的目的”^[2]。另外生产 1t 再生铝能耗只有原铝的 3%到 5%,碳排放也只有原铝的 2%。铝及铝合金综合回收率高于 95%。锻造时所用的润滑剂、冷却液等辅助材料如果处理不当,也会造成水体和土壤污染。

3 绿色制造背景下铝合金锻造加工技术优化措施

3.1 优化锻造工艺参数,提高材料利用率

优化锻造工艺参数,是提高材料利用率最直接有效的方法。根据合理的坯料形状和尺寸、准确的锻造温度和变形速度、良好的模具结构和润滑条件,可以大大减小飞边量和切削余量,使锻件形状更接近最终成品。采用单面分步冲孔工艺和优化坯料结构等手段,使冷料加热次数由原

来的 3 次减少到 1 次, 生产工序由原来的 16 个减少到 11 个, 材料利用率从原来的 61.8% 提高到现在的 84.6%。
 2A14 铝合金等温锻造态下组织比普通锻造更细, 力学性能得到明显改善。铝合金常温锻造和数控加工相结合的机壳生产工艺, 把挤型铝合金原材放入模具锻压成粗胚, 再经过数控加工精修成型, 材料利用率大大提高, 加工时间减少 30%。为了方便直观比较不同的优化措施效果, 表 1 给出了典型的优化方案以及材料利用率提高效果。

3.2 应用节能环保型锻造设备

锻造设备的能效越高, 在加工过程中消耗的能源就越多, 碳排放强度也就越大。推广应用节能环保型锻造设备, 是实现绿色制造的重要硬件保证。兆瓦级高温超导电磁感应加热设备主要用于铝合金等金属的加工, 在国内属于技术领先。东北轻合金有限责任公司中铝东轻铝锻压生产线绿色降碳节能改造项目, 采用联创超导公司研制的 MW 级航空铝合金专用型超导感应加热装置, 安装在航空铝锻压生产线车间, 代替原有的工频感应加热炉。原来操作条件下, 加热同规格铸锭耗时 9 小时, 而该装置不需要预热控温, 在 10 分钟内就能实现均衡加热, 温差控制在 5℃-8℃ 范围内, 电单耗降低 5%。同样规格的铝棒, 用传统的燃气炉加热到 500 摄氏度要近 9 个小时, 用此设备只需要 10 分钟左右, 效率大大提高, 节能 50% 左右^[3]。短流程锻造加工技术采用均质-高温锻造-产品降温-人工时效的新工艺流程, 大大简化了传统生产工艺中均质后铝棒冷却再加热过程、挤压成型、离线固溶和产品锻造前升温过程, 大幅度降低能耗, 提高生产效率。另外, 用液压数控系统代替进口产品, 在实现关键技术自主可控的同时也有利于降低设备运行能耗。

3.3 加强锻造过程质量控制

加强锻造全过程的质量控制, 可以减少废品产生, 也可以避免材料和能源的浪费。质量控制要覆盖原材料检验、坯料加热、锻造成形、热处理以及后续加工等各个环节。

在工艺设计阶段利用有限元数值模拟对成形过程进行预分析, 找出可能存在的折叠、裂纹、充填不足等缺陷风险, 根据缺陷风险来优化模具设计和工艺参数。基于有限元分析, 对 6082 铝合金消防栓接口锻造成形进行了数值模拟和失效机理研究, 针对锻造过程中出现的缺陷, 提出了相应的优化方案, 即在锻造过程中增加预锻并优化下模型腔深度、加大上模凸台以解决金属流动性的难题。过程控制阶段要对坯料温度、模具温度、设备速度等主要参数加以监控, 保证其处在工艺窗口之内。对锻造设备、工艺装备及坯料技术状况进行必要的分析, 保证锻造工艺适应生产实际, 做到先进、合理、完整、准确。AI 视觉检测系统在复杂的图像背景下能够准确地识别出目标的缺陷, 比人工检测提高了日均检测量 5 倍以上, 误判率低于 2%, 产品不良率下降了 15%。

3.4 推进智能化与数字化锻造技术应用

智能化、数字化技术的运用给铝合金锻造加工的绿色转型赋予了新的技术途径。建立锻造过程的数字模型之后, 就可以对工艺参数进行准确的预测以及自主优化控制。模锻过程的数字化建模、自主控制属于实现零件高质量智能锻造的主要难题。以 AA2014 铝合金航空模锻件为例, 利用支持向量回归算法建立的锻造力预测基础模型, 锻模完全充满锻造力的预测误差小于 4.1%; 用贝叶斯优化算法做两轮锻造实验迭代之后, 实际锻造力的预测误差从原来的 6.0% 降低到现在的 1.5%。当模具或者坯料温度发生 -20 或 -40℃ 的扰动时, 用自主优化的方法做锻造实验, 可以将实际的锻造力控制在目标值 180t 左右, 误差范围是 -1.3% 到 +3.1%。数字化技术的使用一方面可以提高加工精度、一致性, 另一方面可以减少由于工艺调整而造成的试模能耗、材料浪费。另外, 通过创建锻造生产执行系统, 对从原料投入至成品产出的全部过程的数据进行收集并加以分析, 从而给工艺的不断改进、排产的优化以及能耗的降低赋予数据支持。

表 1 典型铝合金锻造工艺优化措施及材料利用率对比

优化措施	优化前材料利用率	优化后材料利用率	提升效果	适用范围
环坯结构优化+单面分步冲孔	61.8%	84.6%	+22.8%	大型锻环
等温精密锻造	普通模锻基准	70%~80%	机加工量-70%以上	高精度复杂锻件
常温锻造+数控加工精修	传统全铣工艺基准	显著提高	加工时间-30%	精密结构件
近净成形技术	60%~70%	85%~95%	+25%	各类铝锻件-

3.5 完善废料回收与资源循环利用体系

建立完善的废料回收和资源循环利用体系是达到铝合金锻造绿色闭环的目的。从内部循环上讲,对锻造飞边、切削屑等生产废料进行分类收集并熔炼回用,降低对原生铝的消耗。铝可以无限次地循环使用,回收铝所需的能量比生产原铝少 95%左右,减少排放 90%以上。再生铝企业综合能耗不大于 130kg 标煤/吨,铝及铝合金回收率大于 95%。在生产后端增设回转炉、炒灰机等专用设备,在高温下对铝灰渣进行处理,可以打破传统工艺中铝灰渣直接废弃的瓶颈,提高铝资源的回收率^[4]。从外部循环角

度来讲,要推动上游回收企业同下游应用企业展开合作,创建起涵盖报废回收、分类分选、再生冶炼、锻造加工的完整循环链条。创新使用再生铝液直供模式,把再生铝液直接用作高端铝合金的生产原料,达到保级利用的目的,并且配置渣处理装置对热铝灰进行回收处理,减少金属损耗,实现固废资源的循环利用。从全生命周期的角度来看,促使废铝实现高质化循环利用可以缩减矿产资源的开采量,而且能够大大削减铝合金生产过程中所耗费的综合能源消耗和环境负担。如下图所示。

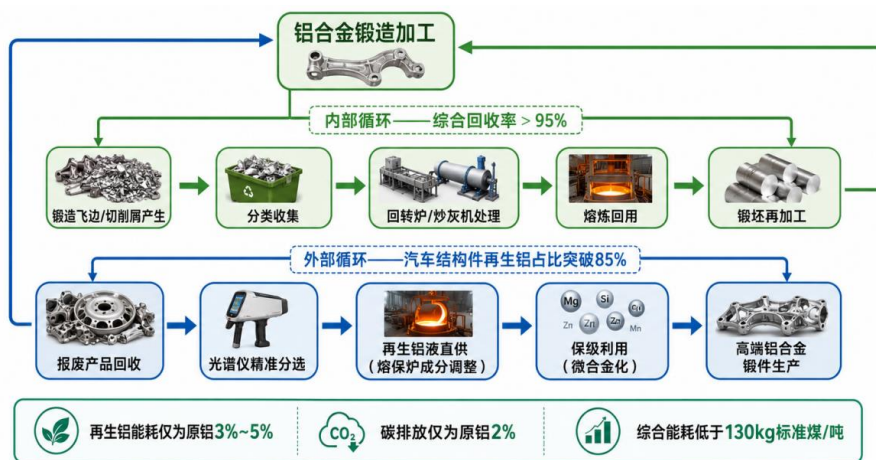


图1 铝合金锻造废料回收与资源循环利用体系示意图

(图注:该图展示了从锻造加工起始端到资源循环末端的完整闭环流程。左上角“铝合金锻造加工”作为废料产生源头,向右延伸出两条并行支路:上方“内部循环”支路经“分类收集→熔炼回用→锻坯再加工”形成闭环回路;下方“外部循环”支路经“报废回收→光谱分选→再生冶炼→保级利用”重新进入锻造生产环节。两条支路分别标注了关键数据指标,底部注明最终产出的环境效益。)

图1 铝合金锻造废料回收与资源循环利用体系示意图

4 结语

绿色制造给铝合金锻造加工技术提出资源高效、能源清洁、质量稳定、循环闭环的要求。本文从工艺特点入手,对目前铝合金锻造在材料利用率、能耗、质量稳定性、资源循环利用等方面存在的问题进行分析,并提出工艺参数优化、节能设备应用、质量控制加强、智能化数字化推进、废料回收体系完善等五个方面的改进措施。从研究结果来看,绿色制造不是对传统锻造技术的否定,而是在保证产品性能的基础上,用技术创新和管理升级的系统集成来达到资源消耗和环境影响的最小化。随着超导加热、等温锻造、数字孪生、再生铝保级利用等技术不断取得突破并走向产业化,铝合金锻造加工在轻量化制造和绿色制造的交

界处将起到越来越重要的作用。

[参考文献]

- [1]付兵.论铝合金模板体系施工技术在绿色建筑施工中的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2026(16):109-111.
 - [2]何佰航,李冬冬,田盼,等.铝合金绿色环保化学转化技术研究进展[J].电镀与精饰,2026,48(5):1-12.
 - [3]张涵瑞.铝合金模板体系施工技术在绿色建筑施工中的应用分析[J].陶瓷,2026(3):211-213.
 - [4]游翔.铝合金模板体系施工技术在绿色建筑施工中的应用分析[J].全面腐蚀控制,2025,39(10):269-271.
- 作者简介:杨阳,男,毕业于许昌职业技术学院数控技术专业,当前就职于中国电建集团河南电力器材有限公司。